



## Contribuições da Geomorfologia no contexto da modelagem hidrológico-hidráulica do escoamento superficial urbano

*Contributions of Geomorphology in the context of hydrological-hydraulic modeling of urban surface runoff*

Luiz Humberto de Freitas Souza<sup>\*1</sup> ; Silvio Carlos Rodrigues<sup>1</sup> ; Jean Roger Bombonato Danelon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

E-mail: silgel@ufu.br (SCR); jean.geoufu@yahoo.com.br (JRBD)

<sup>\*</sup>Email para correspondência: luizhumbertofofsoouza@gmail.com

Recebido (Received): 17/05/2024

Aceito (Accepted): 20/07/2024

**Resumo:** A expansão das áreas urbanizadas nas últimas décadas tem imposto desafios crescentes aos ecossistemas urbanos, evidenciando a interação complexa entre as atividades humanas e o meio físico. Nesse contexto, a Geomorfologia desempenha um papel fundamental ao fornecer ferramentas metodológicas para compreender a morfologia das cidades e sua influência nos processos hidrológicos. O arranjo viário urbano, incluindo aspectos relacionados à impermeabilização da superfície, pode impactar significativamente a direção do fluxo das águas pluviais, comprometendo a eficácia dos sistemas de drenagem e aumentando o risco de alagamentos e inundações. A interferência antrópica desordenada altera substancialmente a dinâmica de escoamento das vertentes, afetando o comportamento das bacias hidrográficas. Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo demonstrar a importância de adotar uma abordagem integrada para entender a complexa interação entre elementos naturais e antrópicos. Para isso, a pesquisa utilizou a modelagem hidrodinâmica do escoamento superficial na escala da microdrenagem, analisando-a sob a perspectiva da Geomorfologia Urbana e Antropogênica. Esta abordagem visa proporcionar uma compreensão abrangente dos processos geomorfológicos urbanos e desenvolver estratégias mais eficazes para a gestão da drenagem.

**Palavras-chave:** Geomorfologia urbana; Geomorfologia antropogênica; Escoamento superficial; Modelagem hidrológico-hidráulica; PCSWMM.

**Abstract:** The expansion of urbanized areas in recent decades has imposed growing challenges on urban ecosystems, highlighting the complex interaction between human activities and the physical environment. In this context, geomorphology plays a fundamental role by providing methodological tools to understand the morphology of cities and its influence on hydrological processes. Urban road networks, including aspects related to surface impermeabilization, can significantly impact the direction of stormwater flow, compromising the effectiveness of drainage systems and increasing the risk of flooding and inundation. Disordered anthropogenic interference substantially alters the runoff dynamics of slopes, affecting the behavior of watersheds. Given this scenario, the present study aims to demonstrate the importance of adopting an integrated approach to understand the complex interaction between natural and anthropogenic elements. To this end, the research utilized hydrodynamic modeling of surface runoff at the microdrainage scale, analyzing it from the perspective of Urban and Anthropogenic Geomorphology. This approach seeks to provide a comprehensive understanding of urban geomorphological processes and to develop more effective strategies for stormwater management.

**Keywords:** Urban geomorphology; Anthropogenic geomorphology; Runoff; Hydrological-hydraulic modeling; PCSWMM.

### 1. Introdução

A expansão das áreas urbanizadas nas últimas décadas tem impulsionado uma série de desafios e estudos relacionados aos ecossistemas urbanos (OLIVEIRA, 2018), especialmente no que se refere à interação entre as atividades humanas e a dinâmica do meio físico. Nesse contexto desafiador, a ciência geomorfológica desempenha um papel fundamental ao disponibilizar métodos e técnicas importantes para aprofundar os estudos sobre a morfologia das cidades e sua influência na dinâmica dos processos hidrológicos.

Um exemplo relevante é o desenho urbano das ruas, cuja configuração e o tipo de material de pavimentação se mostram determinantes no direcionamento dos fluxos de água. Conforme apontado por Rodriguez *et al.* (2003), a canalização e a concentração das águas pluviais em certos trechos viários podem resultar em maior sobrecarga hídrica para os sistemas de drenagem, culminando em problemas como alagamentos, enchentes e inundações. Pedrosa *et al.* (2016) apresentam os efeitos atribuídos à anomalia do padrão ortogonal do arruamento de um bairro localizado no município de Uberlândia, Minas Gerais, onde uma rua específica atravessa transversalmente vários quarteirões, causando a captura e a concentração do fluxo hídrico drenado. Desse modo, a via determina a direção do escoamento, depositando-o em uma série de depressões ao longo do pavimento ou, de modo ainda mais crítico, no fundo do vale. O desenho urbano das vias de tráfego pode interferir consideravelmente sobre o sentido primitivo dos vetores de escoamento, ampliando a magnitude erosiva e a capacidade de transporte dos materiais superficiais.

Com base nas pesquisas realizadas por Rodriguez *et al.* (2013), destaca-se que a morfologia dos ambientes urbanos sofre rápidas evoluções ao longo do tempo, impulsionadas principalmente pela necessidade de incorporação de novos empreendimentos para acomodação do crescimento populacional. Esse processo resulta em um aumento expressivo da densidade urbana e na expansão viária, demandando, por consequência, a readequação e instalação de novos dispositivos de drenagem para a captação e afastamento das águas pluviais.

Su *et al.* (2018) afirmam que a expansão das formas urbanas altera a geomorfologia original e, consequentemente, o ciclo hidrológico natural, reduzindo a capacidade de infiltração e armazenamento de água no solo, principalmente devido ao aumento de superfícies impermeáveis. É necessário destacar que o processo de impermeabilização do solo em ambientes urbanizados pode atingir níveis críticos conforme indica Mata-Lima (2007), limitando as taxas de infiltração em apenas 10% do volume precipitado. A interferência antrópica desordenada também responde por alterações relevantes na dinâmica de escoamento primitivo das vertentes, atribuídas, fundamentalmente, à modificação da rugosidade natural e, consequentemente, das funções hidrológicas e hidráulicas das bacias hidrográficas (TUCCI; BERTONI, 2003; JONES *et al.* 2014).

O desafio da previsão dos eventos climáticos, cada vez mais intensos, tem dificultado a adoção de períodos de retorno mais confiáveis e representativos para o dimensionamento econômico dos dispositivos de drenagem, o que reforça a relevância da geomorfologia urbana e sua relação com a dinâmica hidrológica como suporte para o desenvolvimento multidisciplinar de estratégias de planejamento sustentáveis.

Nesse contexto, as análises da Geomorfologia Urbana e Antropogênica destacam-se por proporcionar uma compreensão mais profunda da interação entre urbanização e processos geomorfológicos, ampliando as estratégias de investigação científica. O planejamento urbano frequentemente negligencia dados morfométricos e outros aspectos geográficos elementares, comprometendo a eficácia das ações de desenvolvimento. Isso resulta em paisagens modificadas cuja resposta aos processos naturais ou antropogênicos se torna imprevisível, podendo ocasionar prejuízos consideráveis.

Ao compreender como as formas urbanas influenciam o escoamento superficial, é possível sugerir intervenções locais mais eficazes para mitigar impactos negativos e promover uma gestão hídrica mais eficiente. Controladores estruturais como taludes de corte, aterros, viadutos e trincheiras alteram o movimento das águas na paisagem induzindo fluxos anômalos à topografia original, aumentando a turbulência e a velocidade de escoamento. Esses aspectos são essenciais para a capacidade de transporte de materiais e o potencial de erosão do pavimento (DANELON; BARCELOS, 2022).

Jorge (2011) destaca que a análise das paisagens urbanas modificadas levanta dois aspectos elementares para reflexão. Primeiramente, ressalta-se o papel diversificado do geomorfólogo e de outros profissionais que, embora compartilhem o mesmo objeto de estudo, exploram o contexto de maneiras distintas. Em segundo lugar, o foco se concentra nas subáreas da Geomorfologia dedicadas à interpretação da fisiografia urbana, as quais podem ser mais profundamente investigadas. Portanto, é fundamental expandir tanto a base teórico-conceitual quanto metodológica da ciência geomorfológica para que contribuições de impacto para os estudos ambientais urbanos sejam efetivamente alcançadas.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo demonstrar a importância de adotar perspectivas integradas diante da interação complexa entre os elementos naturais e antrópicos. Para tanto, a pesquisa utilizou a modelagem hidrodinâmica do escoamento superficial na escala de microdrenagem, analisando-a sob a ótica da Geomorfologia Urbana e Antropogênica. Esta abordagem visa não apenas proporcionar uma compreensão abrangente dos processos geomorfológicos urbanos, mas também desenvolver estratégias mais eficazes para a gestão da drenagem.

### 1.1. Aspectos da morfologia urbana no contexto geomorfológico

A Geomorfologia Urbana, subcampo da Geomorfologia Antropogênica, segundo Thornbush & Allen (2018), analisa as formas artificiais do relevo urbano e a interação entre processos geomorfológicos antropogênicos e naturais (COATES, 1984; SHERMAN, 1989; JORGE, 2011). A emergência desse campo decorre da compreensão da extensão das atividades humanas sobre o meio urbano, acelerando processos geomorfológicos e promovendo uma nova morfodinâmica (NIR, 1983; GUERRA, 2011; FERRARI, 2018; CHENGTAI, 1996).

Li *et al.* (2017) discute os processos geomorfológicos antropogênicos diretos, como acumulação (processos construtivos) e denudação (processos destrutivos), que remodelam intensamente a superfície terrestre. Essas ações modificam os processos circulatórios de matéria e energia nos ambientes geomorfológicos, afetando elementos físicos, químicos e biológicos (GOUDIE, 2013).

Esses processos estão associados à supressão da cobertura vegetal, execução de cortes, aterros, impermeabilização da superfície e intervenções no parcelamento do solo para a instalação de formas urbanas (quadras, lotes, edificações) e execução de obras de drenagem (retinização, canalização, tamponamento e desvio de canais fluviais). Tais modificações acarretam impactos ambientais consideráveis, influenciando diretamente a dinâmica de escoamento superficial, subsuperficial e os padrões de drenagem natural das vertentes (FUJIMOTO, 2005; FERRARI, 2018).

Nas últimas décadas, os temas geomorfológicos ganharam destaque, especialmente no contexto do Antropoceno, mudanças climáticas e desastres naturais (KEILER *et al.* 2010; STOFFEL; HUGGEL, 2012). Fenômenos como aumento do nível do mar, inundações, enchentes, alagamentos, erosões, colapsos do solo e outros riscos geomorfológicos têm despertado interesse crescente na mídia, atribuídos a eventos extremos. Medidas de prevenção e mitigação exigem a compreensão aprofundada da ciência geomorfológica contemporânea (LAIMER, 2021).

Metodologicamente, o reconhecimento e mapeamento das formas de relevo em ambientes urbanos diferem substancialmente daqueles realizados em áreas naturais, onde as características geomorfológicas são mais evidentes. Portanto, levantamentos geomorfológicos em áreas urbanizadas requerem observações morfológicas mais detalhadas (BRANDOLINI *et al.* 2020).

No contexto dos resultados das simulações hidrodinâmicas, é necessário entender os processos de modificação da paisagem urbana. Com a alteração da morfologia natural, ocorre uma adaptação forçada da hidráulica do ambiente, o que demanda ajustes nos sistemas de escoamento das águas pluviais para adaptarem-se à nova configuração do relevo. No entanto, essa readaptação nem sempre é simples e pode resultar em efeitos adversos como o redirecionamento e a concentração de fluxo.

Desde a segunda metade do século passado, tem-se observado uma crescente busca por soluções destinadas à mitigação dos impactos causados por alagamentos e inundações urbanas, o que justifica inúmeras pesquisas sobre o uso de modelos hidrológico-hidráulicos na simulação da dinâmica das águas pluviais em ambientes complexos (FENG *et al.* 2020). A revolução digital pós-1960 permitiu avanços relevantes no processo de modelagem, incluindo métodos unidimensionais e bidimensionais (1D/2D) da hidrodinâmica, além do incremento de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) para operação gerencial de grandes bancos de dados, tratamento da informação e mapeamento (ZOPPOU, 2001; FERNÁNDEZ; LUTZ, 2010; BIRGANI; AZDANDOOST, 2018).

Conforme mencionado por Luo *et al.* (2022), a simulação do escoamento superficial urbano e seu processo de confluência são etapas essenciais na construção de modelos de inundação. Na escala de microdrenagem, entre as principais causas de alagamentos nas ruas, estão a má localização de "bocas de lobo" e a capacidade inadequada de captação e escoamento desses elementos. A ineficiência da drenagem, especialmente a montante das áreas adjacentes, gera impactos negativos nas sub-bacias urbanas. Além disso, erros no dimensionamento dos sistemas de drenagem ou a completa ausência dessas soluções sobrecarregam as áreas vizinhas, alterando o padrão do hidrograma de cálculo e aumentando o pico de vazão (TUCCI, 1995; 2001). Nesse contexto, torna-se essencial adotar uma abordagem multidisciplinar e holística na concepção dos sistemas de drenagem.

O quadro morfológico delineado reflete a problemática das grandes cidades contemporâneas, densamente edificadas e predominantemente impermeabilizadas, atribuindo grande relevância aos estudos sobre os efeitos adversos provocados pela rápida concentração do Escoamento Superficial Direto (ESD). O aumento da cobertura impermeável sob diferentes perspectivas de urbanização afeta diretamente a resposta hidrológica das bacias hidrográficas (**Figura 1**).



**Figura 1:** Resposta hidrológica sob diferentes perspectivas de urbanização. (a) Condição pré-urbanização; (b) Condição urbana combinada com soluções ecológicas; (c) Condição essencialmente urbana. Obs.: A variação do tamanho das setas indica a variação quantitativa da variável. Fonte: Adaptado de Arnold & Gibbons (1996) e Gonçalves (2022). Organização: Autores, 2023.

O grau de impermeabilização é fundamental para entender a dinâmica do ESD (LEAL *et al.* 2018; DU *et al.* 2019; TATE *et al.* 2021). A Região Metropolitana de São Paulo, identificada pela ONU (2018) como o quarto maior aglomerado urbano do mundo, exemplifica essa situação. Sua área urbanizada abrange 57% do território do município (SMUL, 2023), e o sistema viário é predominantemente impermeabilizado (SNIS, 2021). O AR6 do IPCC (2023) cita os impactos das mudanças climáticas, destacando o aumento de eventos climáticos extremos, exacerbados pela intensificação das atividades humanas e pelo crescimento desordenado das áreas urbanas.

Thornbush & Allen (2018) enfatizam a complexidade crescente da paisagem urbanizada, o que dificulta distinguir o natural e o antropogênico. Além disso, as soluções convencionais de drenagem estão se tornando inadequadas diante das chuvas intensas. Nesse contexto, há uma necessidade crescente por sistemas que se adaptem melhor à morfologia urbana em expansão (HUANG, 2020; UNESCO, 2020; SEYEDASHRAF, 2023).

Com esse cenário, novas abordagens surgem, tais como o estudo da influência das edificações no redirecionamento do escoamento urbano (LUO *et al.* 2022) e o uso de SIGs para representar hidrológicamente as bacias, contribuindo para a coleta, gestão, análise e visualização de dados geográficos (BEM, 2016).

## 1.2. Aspectos da morfologia viária das cidades

Nota-se frequentemente que o arranjo viário das cidades apresenta setores com ruas dimensionadas ou acima do necessário, o que resulta em acréscimo de áreas impermeáveis, ou posicionadas de forma desalinhada com as linhas naturais do relevo, contribuindo para a concentração e o aumento da velocidade de fluxo (DEEP, 2004; CABANEK *et al.* 2020). A extensão e a pavimentação das vias podem ser reduzidos por meio da adoção de desenhos urbanos mais integrados às variáveis da paisagem local (MASCARÓ, 2005). A **Figura 2**, por exemplo, ilustra como *layouts* mais integrados ao relevo podem contribuir para a redução das superfícies impermeáveis em até 26% (MDE, 1999; DEEP, 2004).



**Figura 2:** Extensão aproximada em quilômetros, para ruas com diferentes opções de *layout*. Fonte: Adaptado de MDE (1999); DEEP (2004). Organização: Autores, 2023.



Loteamentos em grade geralmente possuem vias mais extensas, mas nenhum *layout* é universalmente adequado devido à influência da topografia local, densidade populacional, tráfego esperado e planejamento do parcelamento (DEEP, 2004). O IPCC (2023) destaca a necessidade de adaptar esses espaços, preservando e restaurando ecossistemas remanescentes, promovendo soluções sustentáveis como o "esverdeamento" urbano, recuperação de zonas úmidas e (re)vegetação de cursos d'água.

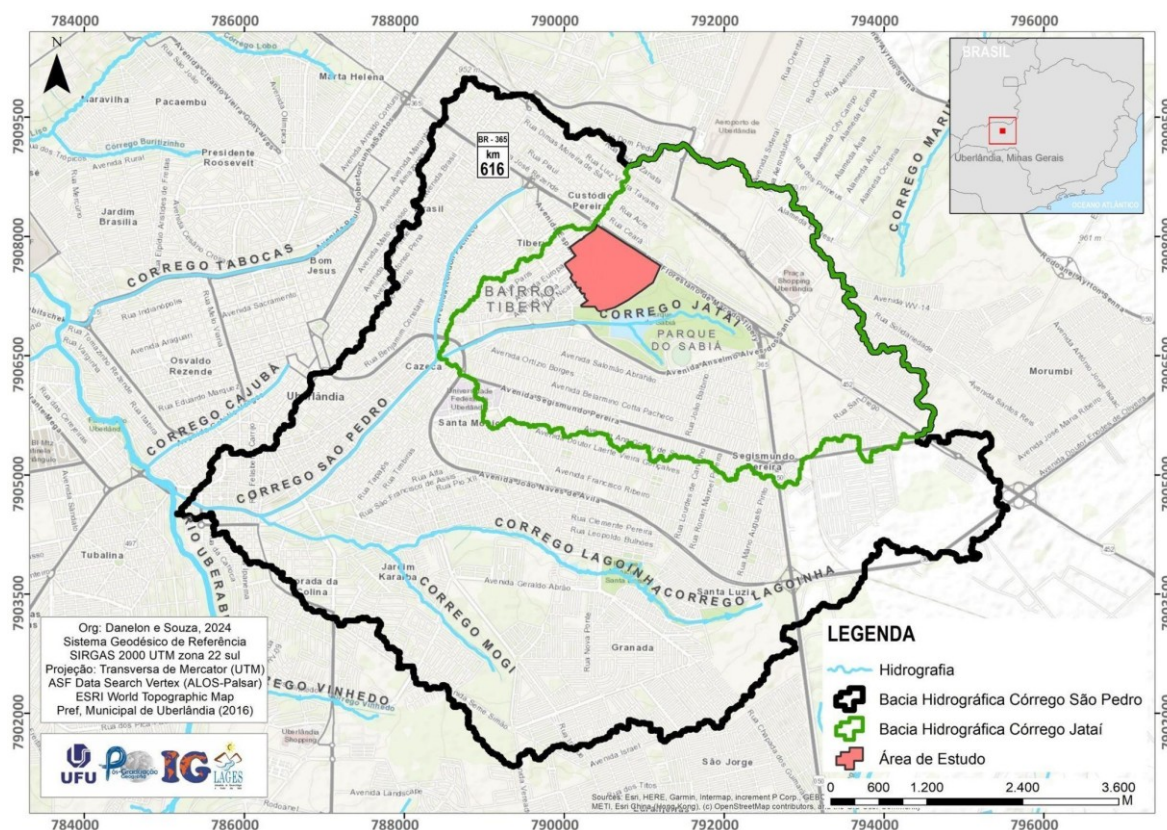
Medidas combinadas, tanto estruturais (obras) quanto não estruturais (dispositivos legais e normativos), têm o potencial de reduzir perdas humanas em eventos extremos, abrangendo gestão de riscos, manejo de águas urbanas, alertas precoces, serviços climatológicos e redes de segurança social, com aplicabilidade em diversos setores (IPCC, 2023). Na China, por exemplo, aproximadamente 3,6 bilhões de pessoas vivem em áreas altamente vulneráveis às mudanças climáticas, enfrentando desafios críticos devido à rápida urbanização e às mudanças climáticas (ZINDA *et al.* 2018).

Nesse contexto, a ciência geomorfológica se destaca como uma ferramenta complementar para a gestão abrangente das cidades, enfatizando o planejamento do uso da terra, o *design* urbano eficiente e ecológico, o *retrofit* de sistemas viários e espaços públicos, a redução do consumo de energia e os avanços em bioengenharia. Suas contribuições são fundamentais para enfrentar os impactos das mudanças climáticas, incluindo medidas de mitigação para alagamentos, inundações e enchentes, utilizando modelos para cenários, avaliação e antecipação de ações necessárias (COATES, 1984; IPCC, 2023).

## 2. Dados de entrada do modelo

O modelo concebido para este trabalho é baseado em uma amostra localizada na região leste da cidade de Uberlândia (MG), cuja área urbana está situada sobre o divisor de águas das bacias dos rios Uberabinha e Araguari. O sítio geográfico de estudo concentra-se na sub-bacia do córrego Jataí, que possui uma área aproximada de 15,99 km<sup>2</sup> e está inserida na sub-bacia do córrego São Pedro (DIAS, 2015). Esta última abrange, além do córrego Jataí, os córregos Lagoinha e Mogi (**Figura 3**).

A delimitação da bacia do córrego São Pedro foi desenvolvida por Caixeta (2017), que utilizou cartas topográficas do Ministério do Exército de 1984 na escala 1:25.000. O contorno da sub-bacia do córrego Jataí foi definido a partir de Dias (2015), que usou o mapa planialtimétrico de Uberlândia de 2010, em escala 1:20.000, com curvas de nível equidistantes de um metro o que possibilitou o desenvolvimento do Modelo Digital do Terreno (MDT) utilizado neste estudo.

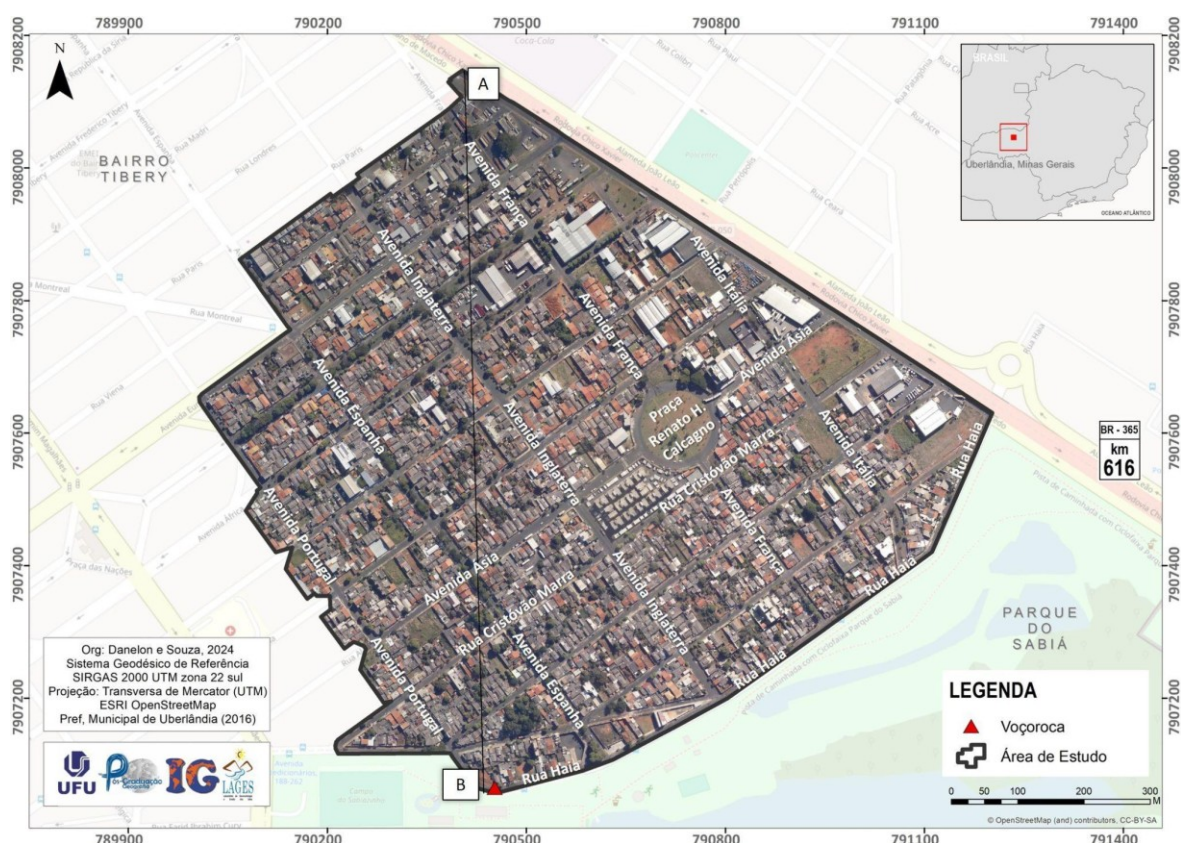


**Figura 3:** Sítio geográfico de estudo. Organização: Autores, 2024.

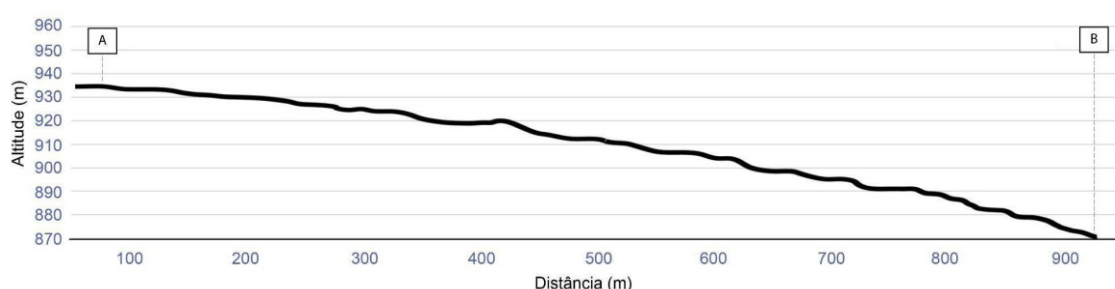
Esta pesquisa visa analisar os resultados de simulações hidrodinâmicas utilizando novas abordagens científicas, com foco em aspectos morfológicos urbanos. A análise é realizada em uma "Área Urbana Inconsolidada" (ANDRADE *et al.* 2014), que corresponde a um recorte amostral da margem direita do córrego Jataí. Segundo Dias (2015), esse córrego está canalizado sob a avenida Anselmo Alves dos Santos até sua confluência com o córrego São Pedro, o qual também corre canalizado em galerias sob a avenida Governador Rondon Pacheco. A classificação de uso e ocupação do solo proposta por Andrade *et al.* (2014) descreve essa área como um bairro populoso, situado nas proximidades da região central da cidade, com morfologia tipicamente urbana, predominantemente composta por edificações de pequeno e médio porte, e escassez de terrenos desocupados.

Postula-se que a morfologia desse tipo de ambiente, especialmente o sistema viário, influencia diretamente o escoamento superficial. A hipótese a ser confirmada é que os elementos morfológicos e hidrológicos mencionados estão correlacionados com o comportamento dinâmico das águas pluviais. Dessa forma, a modelagem do padrão de escoamento apresentada neste estudo foi inicialmente concebida com a delimitação de um *buffer*, abrangendo aproximadamente 76,50 hectares (**Figura 4**).

Em termos gerais, a amostra espacial apresenta características de relevo homogêneo, de origem denudacional, com topo plano ou tabular (BACCARO *et al.* 2001; PEREIRA, 2021). A área possui uma inclinação suave de 3% distribuída ao longo de uma vertente com cerca de 1,00 km de extensão, com variação altimétrica em torno de 50 m (**Figura 5**).



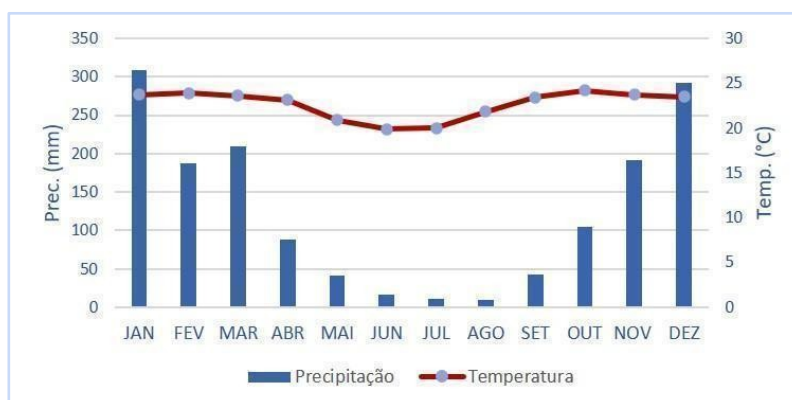
**Figura 4:** Mapa de localização da área de estudo. Organização: Autores, 2023.



**Figura 5:** Perfil topográfico A - B da área de estudo. Organização: Autores, 2023.



A cidade de Uberlândia se insere nos domínios do clima tropical semiúmido, com dois períodos distintos (PETRUCCI, 2018). De acordo com a classificação climática de Köppen (1936), essa condição é definida como Aw - megatérmico, tropical com verão chuvoso e inverno seco (**Figura 6**). Esse padrão climático favorece eventos concentrados de precipitação ao longo do ano, principalmente no verão, o que pode gerar chuvas intensas, com reflexos imediatos sobre paisagens urbanizadas, como demonstrado no presente estudo.



**Figura 6:** Climograma do município de Uberlândia (MG), série histórica 1981 - 2015. Fonte: Adaptado de Petrucci (2018). Organização: Autores, 2023.

As simulações das condições hidrológicas tiveram como ponto de partida a aplicação da equação da curva de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) desenvolvida por Petrucci (2018), estabelecida com base na compilação das ocorrências de precipitações máximas das séries históricas entre os anos de 1981 e 2015, registradas pela estação meteorológica do Campus Universitário Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

A amostra selecionada, portanto, é objeto de uma modelagem hidrodinâmica do escoamento superficial, visando analisar os resultados simulados com foco nos aspectos morfológicos urbanos, especialmente nas vias de tráfego, na escala de microdrenagem, durante um evento de precipitação hipotética. Este estudo utiliza o *software* PCSWMM (*Personal Computer Storm Water Management Model*).

As quadras do recorte espacial foram consideradas sub-bacias de contribuição (U.S. EPA, 2022), derivadas do MDT concebido a partir do mapa planialtimétrico de Uberlândia de 2010, em escala 1:20.000, com curvas de nível equidistantes de um metro. O cenário de precipitação adotado corresponde ao Tempo de Retorno (Tr) de 10 anos, amplamente utilizado no dimensionamento de soluções de microdrenagem (PORTO, 1995; SUDERHSA, 2002; REZENDE; MIGUEZ, 2021).

O método de Chicago, proposto por Keifer & Chu (1957), é empregado na determinação do padrão do hietograma hipotético, utilizando a curva IDF local. Esse método possibilita a criação dos extremos de precipitação necessários para a calibração hidrológica do PCSWMM e para a simulação das condições de escoamento.

Atualmente, a disponibilidade de dados primários de topografia, uso da terra e cobertura da terra, tratados espacialmente por SIGs, aliada ao constante avanço tecnológico, tem contribuído substancialmente para o desenvolvimento de modelos computacionais distribuídos, oferecendo maior precisão na discretização espacial (LIMA, 2017). Destaca-se que o PCSWMM é capaz de organizar esses dados espaciais do MDT em planilhas eletrônicas, assim como as informações resultantes da simulação, as quais podem ser exportadas para *softwares* SIG para manipulação e produção de documentos específicos. Essa abordagem permite investigar o comportamento do escoamento em diferentes cenários, considerando variáveis como a intensidade das chuvas, a capacidade de infiltração do solo e a eficiência dos sistemas de drenagem existentes. Dessa forma, é possível entender sob a ótica da Geomorfologia Urbana e Antropogênica, sobretudo no contexto dos processos geomorfológicos, como a morfologia local influencia a dinâmica do fluxo em vias de tráfego.

É relevante destacar que o *software* PCSWMM ganhou ampla popularidade entre profissionais em diversos países (SIDEK, 2021), especialmente devido ao seu suporte abrangente para análises hidrológico-hidráulicas, projetos de Desenvolvimento de Baixo Impacto (*Low Impact Development* - LID), Sistemas de Drenagem Urbana Sustentáveis (SUDs) e qualidade da água (CHI, 2022). Lappicy *et al.* (2020) descreveram o uso dessa ferramenta no estudo das Unidades Hidrográficas (UH) do Lago Paranoá e Riacho Fundo, no

Distrito Federal (DF), Brasil, onde importaram bases de dados do sistema de drenagem de uma bacia urbana com menos de 9 km<sup>2</sup> e realizaram simulações com diferentes padrões de precipitação. Eles investigaram a produção de escoamento superficial utilizando o Método do Número da Curva - CN, similarmente adotado neste estudo (PRUSKI, 2014).

Nota-se que um sistema de microdrenagem urbana é essencialmente constituído por sarjetas, que correspondem aos espaços adjacentes ao meio-fio nas vias públicas, e bocas de lobo, responsáveis por captar as águas e direcioná-las para tubulações, galerias, canais fluviais, entre outros (REZENDE; MIGUEZ, 2021). Salienta-se que, na simulação das condições de deflúvio, optou-se por adotar um Tempo de Retorno (Tr) de 10 anos, devido à razão já mencionada.

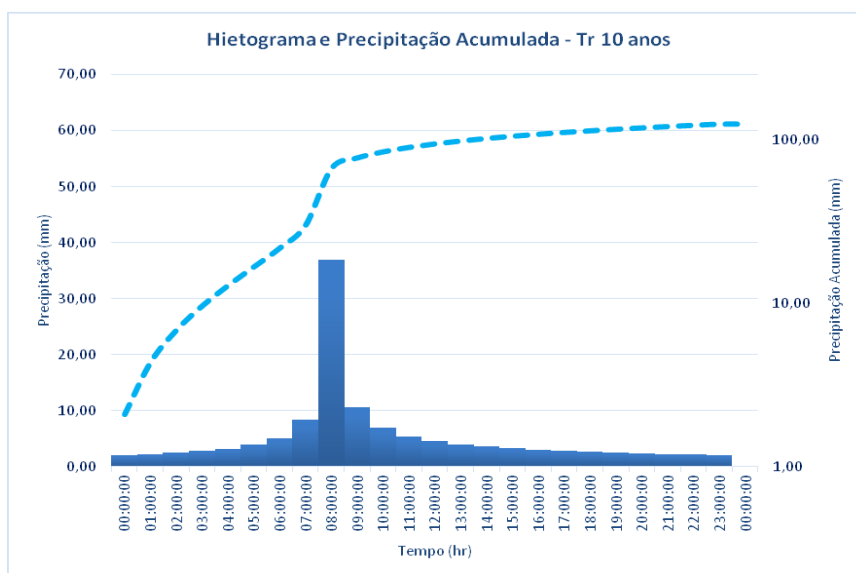
Conforme discutido por Wilken (1978), uma precipitação cuja distribuição espaço-temporal esteja bem definida, atuando sobre uma bacia hidrográfica com características geomorfológicas distintas, padrões de cobertura da terra variados, e considerando suas condições iniciais hidrológicas e climáticas, pode ser representada por meio de um Hidrograma Unitário (HU), que caracteriza a resposta hidrológica do sistema.

Nesse contexto, a parametrização hidrológica do modelo PCSWMM foi conduzida através da formulação de um evento hipotético de precipitação com duração de 24 horas, discretizado em intervalos de 5 minutos. Esse processo envolveu iterações adequadas ao Tempo de Retorno (Tr) definido, resultando no hietograma calculado e no acumulado de chuvas apresentados na **Figura 7**.

Com o objetivo de simular a dinâmica do escoamento superficial direto (ESD) e explorar a influência da morfologia urbana, especialmente das ruas locais, no controle e direcionamento dos fluxos superficiais, foram discretizadas 56 sub-bacias, cada uma representando as quadras resultantes do parcelamento do solo.

Cada sub-bacia é tratada pelo PCSWMM como um reservatório não linear, onde as contribuições são somadas sequencialmente (U.S. EPA, 2022). O *software* considera diversos fluxos de saída para o reservatório hipotético, como infiltração, evaporação e escoamento superficial. A capacidade total corresponde ao máximo armazenamento em depressões, incluindo água proveniente de interceptação e saturação.

O coeficiente de rugosidade de Manning (n) é fundamental para o roteamento do transporte hidráulico em condutos livres e canais abertos, utilizando equações unidimensionais de conservação das massas e quantidade de movimento (equações de Saint Venant, séc. XIX), conforme descrito por Porto (2006). Essas equações são essenciais para estudar os transientes hidráulicos em escoamentos livres. O *software* é capaz de realizar cálculos para diferentes condições de escoamento: movimento essencialmente uniforme, adequado para análises simplificadas; onda cinemática, utilizada em redes ramificadas com longos tempos de duração do transporte; e onda dinâmica, mais complexa e aplicável a malhas e condições de escoamento mais complexas. Neste estudo, o modelo da onda dinâmica foi simplificado, omitindo os termos de aceleração convectiva e local das equações de Saint Venant devido à sua relevância considerada mínima, e o transporte do fluxo de escoamento foi simulado usando a abordagem da onda difusiva.



**Figura 7:** Hietograma e Acumulado de Chuva para o Tempo de Retorno (Tr) 10 anos. Organização: Autores, 2023.



O PCSWMM também oferece a flexibilidade de utilizar diferentes modelos de infiltração, como os de Horton e Horton Modificado (HORTON, 1941), Green-Ampt e Green-Ampt Modificado (FRIDA, 2021), além do método do Número da Curva (CN). Neste estudo, foi escolhido o método CN conforme definido pelo *Soil Conservation Service* (SCS-USDA) que pressupõe a capacidade de infiltração total usando um número CN tabelado (PORTO, 1995; TUCCI, 2001; SUDERHSA, 2002; GRIBBIN, 2014), levando em conta diversas características físicas, incluindo a capacidade de percolação determinada pelas propriedades granulométricas do material superficial.

Para áreas majoritariamente urbanizadas como a região estudada, é comum encontrar grandes extensões de áreas impermeáveis. Seguindo a tabela de valores predefinidos para bacias urbanas e suburbanas, adotou-se de modo preliminar o valor CN = 90 para zonas residenciais com lotes predominantemente menores que 500 m<sup>2</sup> e com área média impermeável superior a 65%. Para os arruamentos com pavimentação asfáltica (totalmente impermeável), foi utilizado o valor CN = 98.

Os solos da área de estudo foram classificados com base nos perfis resultantes da prospecção geotécnica realizada por uma empresa especializada em sondagens e fundações para a construção de um condomínio multifamiliar. Os furos de sondagem à percussão foram executados na porção central do recorte espacial, delimitada pelas avenidas Inglaterra, Ásia, rua Cristóvão Marra e Praça Renato Humberto Calcagno, no ano de 2002. O material classificado nas sondagens até a profundidade média de 10 metros é predominantemente composto por argila arenosa marrom. De acordo com Rosa (2017), esse material corresponde a Latossolos Vermelhos Distróficos, predominantes em toda a área urbana de Uberlândia, especialmente nas morfologias planas e suavemente onduladas. Nas médias vertentes em direção ao vale do rio Uberabinha, ocorre uma associação de Latossolos Vermelhos Distroféricos e Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos.

Geologicamente, o material deposicional de superfície na área de estudo é composto pelo contato entre as unidades "Transportado Cobertura de Chapada" (TCC) e "Residual da Formação Marília" (RFM), conforme identificado nos estudos de Nishiyama (1998) e Caixeta (2017). Esta caracterização é complementada pelo zoneamento pedológico da bacia do rio Uberabinha realizado por Rosa (2017), que indica a predominância de solos argilo-arenosos da unidade TCC na área de estudo, com alternância de frações mais arenosas influenciadas pelo material da unidade RFM. Essa composição permitiu a classificação do grupo hidrológico do solo pelo método Curva-Número (CN - SCS) como "Grupo C".

Destaca-se que a elaboração da carta geológica do Município de Uberlândia, realizada por Nishiyama (1998), utilizou fotografias aéreas na escala 1:25.000 e folhas topográficas na escala 1:100.000. Já os estudos sobre unidades de paisagem e zoneamento da bacia do rio Uberabinha, conduzidos por Rosa (2017), utilizaram cartas topográficas na escala de 1:100.000, a mesma aplicada na elaboração da carta geológica de Nishiyama.

O "Grupo C" é caracterizado por materiais com teor total de argila entre 20% e 30%, sem camadas essencialmente impermeáveis ou com pedras até a profundidade de 1,20 m. Embora esses solos não sejam extremamente impermeáveis, sua capacidade de infiltração é abaixo da média devido à considerável quantidade de argila, o que pode resultar em um escoamento superficial significativo (PORTO, 1995; TUCCI, 2001).

Após a definição do grupo hidrológico, o próximo passo consistiu na seleção hipotética da condição de umidade antecedente das áreas permeáveis, as quais, conforme estabelecido pelo artigo nº 82 da Lei do Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo do Município de Uberlândia (2020), correspondem a um mínimo de 20% da área de estudo. Em seguida, adotou-se a situação normal, classificada como tipo II (intermediária), conforme os padrões das tabelas de números CN, o que dispensa ajustes necessários para as condições de solo seco (tipo I) ou saturado (tipo III).

Notadamente, espera-se que a alta variabilidade dos padrões de rugosidade da superfície urbana, caracterizada sobretudo pelo escoamento difuso das águas pluviais, pela retenção específica (por adesão e/ou capilaridade do material de cobertura) e pelos meios diversificados de infiltração, resulte em um amplo conjunto de interferências sobre o tempo de resposta do sistema e, como consequência, reflexos relevantes sobre o comportamento dos sistemas de drenagem (U.S. EPA, 2010; DIAS, 2015).

É importante destacar que um modelo hidrológico-hidráulico é considerado "aberto" quando mantém interações constantes com o ambiente circundante, resultando em trocas contínuas de energia e matéria (VIESSMAN *et al.*, 1972; CHOW *et al.* 1988; DINGMAN, 2015). Contudo, dentro do campo de pesquisa, um desafio de grande envergadura reside na questão do dimensionamento ou na caracterização completa de um modelo que busque incorporar a influência de heterogeneidades em pequena escala nos fluxos de grande escala, bem como nas complexas interações entre processos e conectividade da água na paisagem. Esse desafio de dimensionamento hidrológico-hidráulico em cenários complexos é universal (WOOD *et al.* 1988).

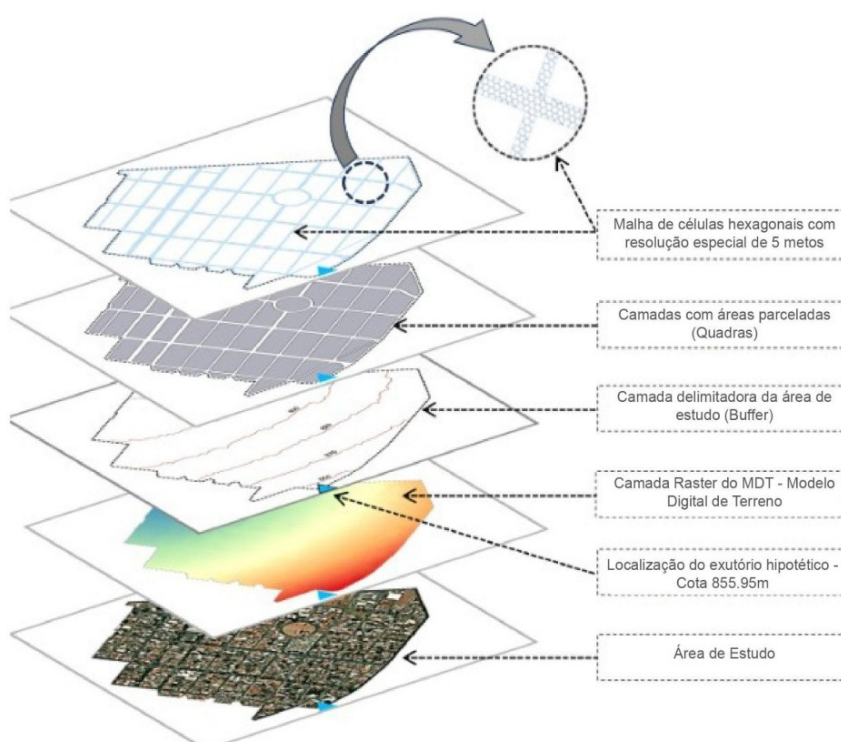
Antes da execução do modelo, o PCSWMM requer a seleção de pelo menos um nó como ponto de saída do sistema, que pode representar tanto uma descarga real quanto uma descarga hipotética da vazão produzida. Isso possibilita a opção de adotar um "sistema parcialmente fechado", permitindo ao pesquisador especificar *inputs* e *outputs* ou optar por uma abordagem presumível, conforme delineado neste estudo, o que simplifica a simulação hidrodinâmica, focando nos fatores morfológicos que influenciam o comportamento hidrológico. A escolha entre as abordagens depende dos recursos disponíveis para coleta de dados primários e do nível de detalhamento desejado nas análises, além das circunstâncias específicas do estudo (U.S. EPA, 2010; DIAS, 2015).

Em posse dos dados de *input*, avançou-se para a etapa de configuração e execução do arranjo do modelo hidrológico-hidráulico onde, inicialmente, houve a importação de três camadas para o PCSWMM, com informações da área de estudo, sendo estas: (1) camada vetorial delimitadora da área de estudo (*buffer*); (2) camada vetorial com áreas parceladas (quadras); e (3) camada do MDT elaborado (**Figura 8**).

Considerando o enfoque espacial como um sistema de natureza "parcialmente fechado" e, em uma "abordagem hipotética" que desconsidera a existência de dispositivos de drenagem preexistentes, foi desenvolvido um modelo de malha utilizando células hexagonais, com uma resolução espacial de 5 metros entre os centros de gravidade de cada geometria (nós de conexão 2D). Este modelo abrange todas as vias de tráfego definidas pela delimitação do *buffer*. O modelo 1D incorpora os pontos de interseção no interior das células, conectados por canais que percorrem toda a extensão das ruas. O encaminhamento do fluxo na superfície livre das ruas é realizado por meio de um sistema de condutos que se conecta automaticamente pelo *software* às projeções dos nós de conexão 2D.

A escolha da malha hexagonal foi apropriada para ajustar a geometria das vias, à escala de microdrenagem e aos dados de entrada. O processamento do modelo requer, conforme especificado pelo fornecedor do software, os seguintes requisitos mínimos: sistema operacional Windows 7 ou superior; processador com 8 núcleos físicos (ou mais); 16 GB de memória RAM (com pelo menos 12 GB por instância); velocidade de 3 GHz ou superior; Framework Microsoft .NET 4.8; GPU dedicada com 8 GB de memória (ou mais); resolução de 1366x768 pixels (ou WXGA); e SSD com cache de 2 GB (ou superior para múltiplos projetos).

A restrição do escoamento superficial direto aos condutos que constituem a malha celular é uma característica inerente ao PCSWMM, o qual inicialmente não permite a propagação do fluxo na modelagem bidimensional. A profundidade padrão dos elementos em 2D, estabelecida pelo *software*, é de 30 metros, visando garantir uma ampla margem de variação para a altura da lâmina d'água após a modelagem.



**Figura 8:** Arranjo do modelo hidrológico-hidráulico PCSWMM (sobreposição das camadas elementares). Organização: Autores, 2023.

O exutório do sistema foi empiricamente posicionado à extrema jusante da área de estudo, no encontro da avenida Portugal com a rua Haia, na cota altimétrica de 855,95 m. Esse elemento foi conectado a um nó de junção por um condutor também definido hipoteticamente, definido como uma tubulação de concreto ( $n$  de Manning = 0,013), com seção circular correspondente a 1,50 m de diâmetro e comprimento aproximado de 2,40 m.

Dentre os principais resultados pós-modelagem de superfícies 1D/2D no *software* PCSWMM, destaca-se a altura da lâmina d'água e as vazões geradas pelo evento de precipitação. O processamento dos dados resultantes das condições de contorno fornece elementos organizados em planilhas, aptas a serem exploradas com o uso de ferramentas SIG, possibilitando, por exemplo, o mapeamento das rotas de concentração de fluxo e dos pontos susceptíveis a alagamentos.

### 3. Resultados e discussão

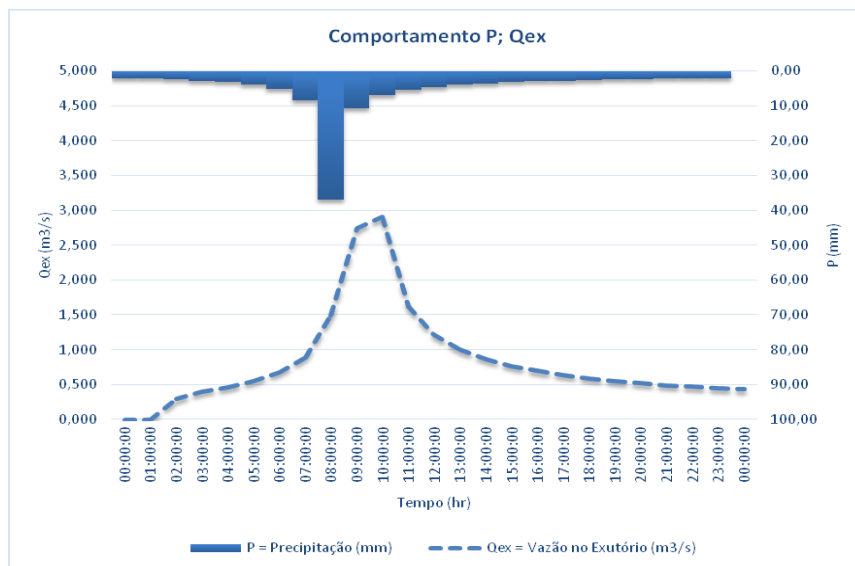
Considerando os prejuízos que as escolhas do arranjo podem causar à modelagem, especialmente à observação do comportamento do escoamento superficial direto no sistema viário, foi realizada uma análise estatística preliminar para avaliar o grau de relação causal e efeito entre a chuva efetiva ( $P_e$ ) calculada pelo PCSWMM e a vazão que flui para o exutório hipotético ( $Q_{ex}$ ). As amostras para avaliação do comportamento estatístico estão apresentadas na **Tabela 1**.

Considerando os dados da **Tabela 1**, é fato que a configuração espaço-temporal de um hidrograma, bem como a evolução hídrica de uma bacia, são governadas por um conjunto de parâmetros físicos. Esses parâmetros abrangem o intervalo de tempo decorrido após o início da precipitação (TUCCI, 2001), influenciado por abstrações iniciais atribuídas à interceptação, retenção e acumulação em depressões superficiais. Com base nisso, pode-se traçar a resposta hidrológica para a área de estudo (**Figura 9**).

**Tabela 1:** Séries de chuva efetiva ( $P_e$ ) e vazão roteada no exutório ( $Q_{ex}$ ), calculadas pelo PCSWMM, Tr 10 anos.

Espaço temporal (hora)	Chuva Total P (mm)	Chuva Efetiva Pe (mm)	Vazão Exutório Qex (m3/s)
00:00:00	2,080	2,004	0,000
01:00:00	2,261	2,172	0,013
02:00:00	2,491	2,376	0,295
03:00:00	2,795	2,640	0,407
04:00:00	3,220	3,000	0,466
05:00:00	3,874	3,516	0,558
06:00:00	5,062	4,380	0,685
07:00:00	8,410	6,156	0,898
08:00:00	37,000	14,016	1,499
09:00:00	10,607	14,316	2,748
10:00:00	6,955	8,016	2,918
11:00:00	5,442	5,988	1,624
12:00:00	4,572	4,896	1,219
13:00:00	3,993	4,224	1,003
14:00:00	3,574	3,744	0,870
15:00:00	3,254	3,384	0,770
16:00:00	2,999	3,108	0,700
17:00:00	2,791	2,880	0,644
18:00:00	2,617	2,700	0,595
19:00:00	2,469	2,532	0,557
20:00:00	2,341	2,400	0,525
21:00:00	2,229	2,280	0,495
22:00:00	2,130	2,172	0,473
23:00:00	2,042	2,088	0,451
00:00:00	0,000	0,000	0,434
TOTAL	125,208	104,938	20,848

Organização: Autor, 2023.



**Figura 9:** Resposta hidrológica da área de estudo para Tr 10 anos. Organização: Autor, 2023.

Levando-se em conta as hipóteses iniciais  $H_0$  (hipótese nula), que postula igualdade entre as médias de chuva efetiva ( $P_e$ ) e vazão que flui para o exutório ( $Q_{ex}$ ), e  $H_1$  (hipótese alternativa) que prevê a diferença significativa entre essas médias, o valor-p resultante do teste deve ser analisado, de modo que, se o valor-p for acima de 0,05 temos um resultado que não é estatisticamente significativo, levando à não rejeição de  $H_0$ . Isso sugere uma correlação maior do que a observada sob  $H_1$ , ressaltando a importância de análises mais aprofundadas para compreensão dos dados.

Dado o tamanho adequado das amostras destinadas à condução das análises estatísticas ( $nP_e$  e  $nQ_{ex} = 25$  amostras) e as incertezas em relação à conformidade das séries com uma distribuição normal, constata-se a ineficácia da aplicação do teste-t de Student para a estimativa do intervalo de confiança. Optou-se, portanto, pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney, realizado através do *Past Statistical Software* (HAMMER *et al.* 2001), conforme ilustrado na **Figura 10**.

O teste não paramétrico de Mann-Whitney revelou um valor-p significativamente menor que 0,05, indicando a rejeição da hipótese nula e confirmando uma diferença significativa entre as medianas de " $P_e$ " e " $Q_{ex}$ ". Os dados não apresentam distribuição normal. Esse resultado sugere a influência de processos aleatórios no escoamento, afetando a relação entre *inputs* e *outputs* do sistema.

Para avaliar a correlação entre as variáveis " $P_e$ " e " $Q_{ex}$ ", sendo as amostras não paramétricas, o teste de correlação de Spearman é apropriado. Foi adotado um critério qualitativo de intensidade  $|r| \geq 0,90$  (SILVIA; SHIMAKURA, 2006).

O coeficiente  $|r|$  calculado foi igual a 0,92, indicando uma correlação positiva e muito forte entre as variáveis analisadas. Isso demonstra uma associação monotônica significativa entre a chuva efetiva e a vazão no ponto de exutório, com base nos dados resultantes da simulação. Contudo, é importante destacar que esse coeficiente não implica causalidade e não permite determinar diretamente a proporção de variação da vazão explicada pela chuva efetiva.

Tests for equal medians			
<b>A</b>		<b>B</b>	
<b>N:</b>	25	<b>N:</b>	25
<b>Mean rank:</b>	18,09	<b>Mean rank:</b>	7,41
<b>Mann-Whitn U:</b>	45,5		
<b>z:</b>	5,1711	<b>p (same med.):</b>	2,3271E-07
<b>Monte Carlo permutation:</b>		<b>p (same med.):</b>	0,0001

**Figura 10:** Resultado do teste de Mann-Whitney para os conjuntos de dados amostrais ( $P_e$ ;  $Q_{ex}$ ). Fonte: Processado a partir do aplicativo *Past Statistical Software*. Organização: Autor, 2023.

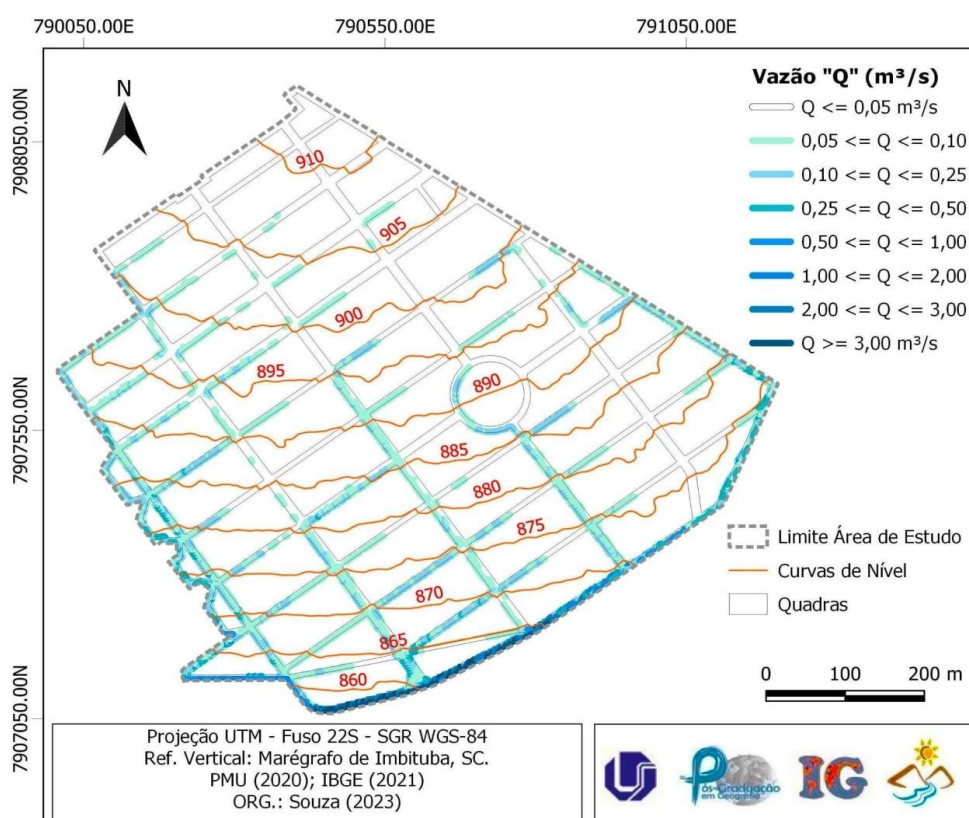


O resultado da modelagem hidrológico-hidráulica ressalta a importância da abordagem geomorfológica para compreender o comportamento da dinâmica de escoamento superficial, influenciado pelo sistema viário local (**Figura 11**). Na análise morfológica da amostra em estudo, a Geomorfologia Urbana e Antropogênica contribui ao examinar de maneira específica os efeitos da interferência humana não planejada no sistema de drenagem das vertentes, auxiliando na compreensão da interação entre urbanização e processos geomorfológicos.

Nota-se na **Figura 11** que as alterações no padrão natural de escoamento das encostas, decorrentes do processo de urbanização e da introdução de pavimentos impermeáveis, assim como soluções convencionais de drenagem, respondem pelo incremento do volume da carga pluvial e pelo aumento da velocidade do fluxo superficial no sistema viário. Essas mudanças também redirecionam o escoamento superficial e intensificam a energia envolvida em seu transporte. Os impactos das modificações nos processos hidrogeomorfológicos de captação e condução das águas das vertentes afetam a infiltração, evapotranspiração, armazenamento e tempo de concentração da bacia hidrográfica.

Considerando os resultados da simulação e os impactos na paisagem urbana, é fundamental selecionar o enfoque sob o qual ocorrerão as abstrações acerca do fenômeno estudado. Nesse sentido, pode-se recorrer à Geomorfologia Urbana e Antropogênica para obter uma melhor compreensão da relação entre as formas antropogênicas e os processos resultantes. Nota-se que a escolha da área de estudo não foi aleatória, uma vez que já havia registros de processos geomorfológicos antropogênicos anteriores, citados por DANELON (2023), datados de 2019, incluindo o desenvolvimento do escoamento de alta dispersão e voçorocamento "*in-loco*". O termo "escoamento de alta dispersão" refere-se ao deflúvio gerado por eventos intensos de precipitação, que nas áreas urbanizadas passa a escoar superficialmente ocupando uma seção que pode exceder a capacidade de captação e condução da microdrenagem. O fluxo excedente pode ocupar parcial ou totalmente a via de tráfego e se estender aos passeios públicos adjacentes, apresentando alta velocidade e volume.

Nesse contexto, durante a simulação do evento, observa-se o acúmulo de água em certos trechos, causado pela concentração do fluxo, que pode resultar da interação entre a vazão "Q", bem como pela ausência ou ineficiência da infraestrutura de drenagem urbana. À medida que o escoamento se distribui pela vertente, acompanhando a morfologia existente, aumenta em velocidade e vazão, dificultando sua captura pelos dispositivos de drenagem. O volume acumulado chega ao exutório com considerável energia.



**Figura 11:** Comportamento dinâmico do escoamento superficial da área de estudo. Organização: Autor, 2023.

No trecho de baixa vertente, próximo à interseção das ruas Haia com as avenidas Portugal, Espanha e Inglaterra (**Figura 4**), é observável no mapa apresentado na **Figura 11**, um expressivo acúmulo de fluxo. É exatamente nesse ponto que o escoamento de alta dispersão desencadeia o processo de voçorocamento, coincidente com o exutório do modelo. Conforme registrado por Danelon (2023), duas voçorocas se desenvolveram nesse local com um intervalo de aproximadamente 30 dias entre as ocorrências. A primeira erosão se formou em 1º de novembro de 2019 após um evento de precipitação de 32 mm em uma hora (INMET, 2019). O processo erosivo começou a partir de fissuras existentes no perímetro de uma boca de lobo localizada na rua Haia, facilitando a infiltração e a retirada de material subsuperficial. Essa remoção causou o colapso da camada asfáltica e a formação de um canal principal que atravessou perpendicularmente à via, atingindo o talude de uma área pública adjacente à rua Haia (**Figura 12a e 12b**).

Com o início da erosão, o poder público imediatamente iniciou obras de recomposição para restaurar as condições anteriores à formação da voçoroca. Esse episódio destaca a importância fundamental do entendimento dos conceitos geomorfológicos na formulação de decisões relacionadas ao ordenamento territorial urbano, especialmente diante da urgência de se recuperar as condições de uso da área afetada. Qualquer intervenção sem uma compreensão adequada da dinâmica da paisagem urbana pode resultar em ações improficuas. Assim, em 09 de dezembro de 2019, após um evento de precipitação de 13 mm em uma hora (INMET, 2019), o local em questão, que havia passado por obras de recomposição, experimentou um novo processo erosivo (**Figura 12c e 12d**). A voçoroca se formou praticamente no mesmo local, variando apenas alguns metros em relação à primeira ocorrência.

Na segunda ocorrência (**Figura 12c e 12d**), a erosão se formou no lado oposto da via, junto ao limite da área pública, que é o Parque Municipal do Sabiá. A voçoroca se desenvolveu devido à infiltração por fissuras que surgiram na interface entre a calçada e o alambrado de cercamento do parque, ambos reconstruídos anteriormente.

O surgimento de duas erosões similares em um curto intervalo de tempo, em uma área densamente urbanizada, suscita uma série de reflexões. Para isso, é necessário realizar uma análise detalhada da paisagem urbana e do cenário dos eventos. Entende-se que os aspectos que definem o pavimento das ruas, somados ao desenho urbano do sistema viário (traçado ortogonal) e à ausência de uma drenagem mais integrada à geomorfologia local, contribuíram diretamente para a formação do escoamento de alta dispersão. Este atuou como mecanismo gerador da energia necessária ao desencadeamento dos processos erosivos mencionados.

Pode-se afirmar que a área de estudo apresenta uma combinação de fatores fisiográficos, incluindo características naturais e intervenções humanas, que contribuem para a concentração das águas pluviais. A área impactada está localizada sobre uma parcela da vertente com padrão de curvatura côncava convergente, o que favorece a convergência das águas para os pontos com topografia inferior.



**Figura 12:** Voçorocamentos que impactaram a área de estudo nos meses de novembro e dezembro de 2019. Organização: Autor, 2023.

A situação morfológica das áreas vizinhas ao sítio geográfico de estudo também desempenha um papel fundamental, direcionando e convergindo o escoamento para áreas geomorfológicamente vulneráveis. Além disso, é legítimo questionar a eficácia da infraestrutura existente, bem como possíveis falhas de projeto, má localização, quantidade insuficiente e subdimensionamento da capacidade de “engolimento” das bocas de lobo. Este aspecto é especialmente relevante considerando que algumas delas recebem um volume de água maior do que outras, o que pode resultar na sobrecarga desses dispositivos.

Adicionalmente, os problemas patológicos como buracos, remendos inadequados, trincas e fissuras, no pavimento e/ou nos dispositivos de drenagem existentes, podem facilitar a infiltração da água por camadas inferiores, com menor estabilidade geotécnica, contribuindo para a aceleração dos processos erosivos, sobretudo por efeito de *piping* (DANELON, 2023).

Assim, a aplicação de modelos preditivos como o desenvolvido no *software* PCSWMM permite aos técnicos e pesquisadores simular e identificar o comportamento dinâmico do escoamento superficial em uma área específica de interesse. Esse recurso é fundamental para validar observações relacionadas aos processos hidrogeomorfológicos, proporcionando uma compreensão mais abrangente das interações entre a infraestrutura urbana, a geomorfologia e os fenômenos hidrológicos.

#### 4. Considerações finais

Nos últimos anos, o interesse acadêmico tem se voltado para a pesquisa de soluções estruturais e não estruturais para as águas pluviais urbanas, com ênfase na resiliência e na capacidade adaptativa das cidades. A urbanização impacta diretamente os aspectos hidráulicos e hidrológicos do relevo, provocando alterações substanciais nos hidrogramas das áreas modificadas antropicamente. Essas modificações, cada vez mais frequentes e complexas, demandam uma compreensão integrada e sistêmica por parte do poder público, visando otimizar o manejo das águas pluviais e assegurar a sustentabilidade urbana a longo prazo.

Nesse contexto, a modelagem hidráulico-hidrológica, aliada à Geomorfologia Urbana e Antropogênica, emerge como uma ferramenta complementar de grande relevância na análise holística das dinâmicas de escoamento superficial e drenagem urbana. Essa abordagem favorece o desenvolvimento de estratégias mais eficientes para a gestão das águas pluviais, adaptando-se às dinâmicas urbanas e às mudanças climáticas.

Este estudo demonstra que uma abordagem puramente quantitativa é inadequada para uma compreensão integrada da cidade, dada a celeridade das alterações e as complexas interações socioambientais que influenciam os fluxos de energia e matéria nesse tipo de ambiente. Os resultados enfatizam a interdependência entre os elementos morfológicos e hídricos urbanos, reforçando a importância da análise multidisciplinar.

A cognição sistêmica dos elementos naturais e antropogênicos configura-se neste caso, como um pré-requisito essencial para o desenvolvimento de cidades inteligentes e resilientes. A modelagem hidráulico-hidrológica, sob a ótica da Geomorfologia Urbana e Antropogênica, visa proporcionar uma visão abrangente dos processos geomorfológicos, facilitando a formulação de estratégias mais eficazes para o manejo dos sistemas de infraestrutura, considerando a resiliência e a sustentabilidade diante dos desafios climáticos e urbanos contemporâneos.

O trabalho apresentado contribui para o entendimento dos processos hidrológicos e geomorfológicos, especialmente na escala da microdrenagem. Futuras pesquisas devem expandir e aprofundar a análise das bacias hidrográficas urbanas, o impacto das soluções convencionais adotadas e os efeitos das mudanças climáticas, com foco nas áreas mais vulneráveis dos ecossistemas urbanos.

Embora a simulação realizada tenha produzido dados satisfatórios, é fundamental adotar cautela em sua extrapolação. Os modelos são ferramentas valiosas para simular e visualizar o comportamento do escoamento, mas seu uso deve ser precedido por uma investigação rigorosa da área de estudo, assim como a qualidade dos dados de entrada. A precisão dos parâmetros e das condições de contorno é essencial para a confiabilidade dos resultados e das análises subsequentes. Garantir a robustez da modelagem e realizar verificações criteriosas são etapas indispensáveis para minimizar incertezas e vieses.

Em suma, a consideração isolada de aspectos quantitativos já não é suficiente diante da rápida transformação das cidades. As constantes mudanças observadas podem comprometer a previsibilidade e a eficácia dos métodos tradicionais de dimensionamento dos mecanismos de captação e condução das águas pluviais. Nesse sentido, a Geomorfologia, especialmente em seus subcampos urbano e antropogênico, deve ser reconhecida não apenas como uma ferramenta científica complementar, mas também como um requisito fundamental para o cumprimento das normas e regulamentos que orientam as políticas públicas de



planejamento e gestão de recursos hídricos. Esse reconhecimento é essencial para lidar com os processos naturais e antropogênicos, além de garantir a conformidade com os requisitos de resiliência urbana exigidos.

## Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada parcialmente pelo CNPQ, Bolsa PQ 302924/2019-1, e Projeto CAPES/UFU/PrInt 88887.311520/2018-00.

## Referências

- ANDRADE, S. L.; FERREIRA, V. O.; SILVA, M. M. Elaboração de um Mapa de Risco de Inundações da Bacia Hidrográfica do Córrego São Pedro, Área Urbana de Uberlândia-MG. **Caderno de Geografia**, v. 24, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/4927/5986>>
- ARNOLD JR., C. L.; GIBBONS, C. J. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. **Journal of the American Planning Association**, Chicago, n. 62:2, p. 243-258. 1996. Published online: 26 nov. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01944369608975688>
- BACCARO, C. A. V.; FERREIRA, I. L.; ROCHA, M. R.; RODRIGUES, S.C. Mapa geomorfológico do Triângulo Mineiro: uma abordagem morfoestrutural-escultural/Triângulo Mineiro geomorphological map: a morphostructural-sculptural approach. **Sociedade & Natureza**, v. 13, n. 25, 2001. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v13-2001-29958>
- BEM, D. A. **Estudo de Hidrograma Unitário Geomorfológico de uma sub-bacia urbana do Ribeirão das Pedras**. 2016. 88 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Campinas. 2016. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2016.979461>
- BIRGANI, Y. T.; AZDANDOOST, F. An Integrated Framework to Evaluate Resilient-Sustainable Urban Drainage Management Plans Using a Combined-adaptive MCDM Technique. **Water Resour. Manage**, v. 32, p. 2817–2835, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1960-2>
- BRANDOLINI, P., CAPPADONIA C., LUBERTI G.M; DONADO, C; MAGGIO, L. S. C; FACCINI, F; STANISLAO, C; VERGARI, F; PALIAGA, G; AGNESI, V; ALEVISOS, G; DEL MONTE, M. Geomorphology of the Anthropocene in Mediterranean urban areas. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 44, p. 461-494, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133319881108>
- BRANDOLINI, P. *et al.* Geomorphological mapping in urban areas. **Journal of Maps**, v. 17:4, p. 1-5, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1952671>
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). **Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021**. Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional. Brasília/DF, 2021. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>
- CABANEK, A., ZINGONI DE BARO, M.E.; NEWMAN, P. Biophilic streets: a design framework for creating multiple urban benefits. **Sustain Earth**, v. 3, 7. 2020. DOI: <https://10.1186/s42055-020-00027-0>
- CAIXETA, A. C. M; FERREIRA, V. de O.; NISHIYAMA, L. Caracterização geotécnica e geoambiental da bacia do córrego São Pedro - Uberlândia/MG: uma contribuição ao planejamento da drenagem urbana. **Sociedade & Natureza**, v. 31, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v31-2019-46344>
- CHENGTAI, D. An approach to theory and methods of Urban Geomorphology. **Chinese Geographical Science**, v. 6, p. 89-96, 1996. Disponível em: <<http://eageoscient.neigae.ac.cn/en/article/id/9229>>.
- CHI. **Personal Computer Storm Water Management Model (PCSWMM)**. Disponível em: <<https://www.pcswmm.com/Features>>.
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. **Applied Hydrology**. 1 ed. New York, McGraw Hill, 1988, 572 p.



- COATES, D. R. Urban geomorphology. In: FINKL C.W. (eds) **Applied Geology**. Encyclopedia of Earth Sciences Series, v. 3. Springer, Boston, MA. 1984. DOI: [https://doi.org/10.1007/0-387-30842-3\\_74](https://doi.org/10.1007/0-387-30842-3_74)
- DANELON, J. R. B. **Processos Antropogênicos Induzidos em meios urbanizados, seu estudo a partir da Geomorfologia Antropogênica no município de Uberlândia - MG**. 2023. 211f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.203>
- DANELON, J. R. B.; BARCELOS, A. C. Processos antropogênicos induzidos em ambientes urbanizados. **Mercator**, Fortaleza, v. 21, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2022.e21033>
- DEEP, Connecticut Department of Energy and Environmental Protection. **Connecticut Stormwater Quality Manual**. Bureau of Water Management. CT, Connecticut, EUA. 2004. Disponível em: <https://portal.ct.gov/DEEP/Water-Regulating-and-Discharges/Stormwater/Stormwater-Manual>
- DIAS, V. S. **Uso de modelo hidrológico em bacia hidrográfica urbana para previsão de enchentes. Estudo de caso: Microbacia do Córrego Jataí - Uberlândia/MG**. 2015. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (UFU), Uberlândia, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14214>.
- DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology**. Long Grove, IL: Waveland Press, 2015.
- DU, J., CHENG, L., ZHANG, Q. *et al.* Different Flooding Behaviors Due to Varied Urbanization Levels within River Basin: A Case Study from the Xiang River Basin, China. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 10, p. 89–102, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-018-0195-4>
- EPA. **Storm Water Management Model (SWMM)**. U.S., 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.
- FENG, B. *et al.* Urban flood hazard mapping using a hydraulic–GIS combined model. **Natural Hazards**, v. 100, p. 1089–1104, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03850-7>
- FERNÁNDEZ, D.S.; LUTZ, M.A. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. **Engineering Geology**, v. 111, Issues 1–4, 2010, p. 90-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- FERRARI, J. **Investigação da morfologia original e antropogênica do Arroio Cadena, Santa Maria/RS**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Geografia da IGEO/UFRGS). Porto Alegre, 2018. 161 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/189253>
- FRIDA, E. Â., *et al.* Evaluating three commonly used infiltration methods for permeable surfaces in urban areas using the SWMM and STORM. **Hydrology Research**, v. 52, p. 160–175. 2021. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2021.048>
- FUJIMOTO, N. S. V. M. Considerações sobre o ambiente urbano: um estudo com ênfase na geomorfologia urbana. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, São Paulo, 16, 76-80, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0008>
- GONÇALVES, L. S. M. **Desenvolvimento de ferramenta para simulação de dispositivos de drenagem urbana sustentável utilizando eventos de chuva característicos**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/16454>
- GOUDIE, A. S. **The Human Impacts on the Natural Environment**. 4 ed. Oxford: Blackwell. 2013.
- GRIBBIN, J. E. **Introdução a Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais**: Tradução da 4ª edição norte-americana. Cengage Learning Brasil, 2014. E-book. ISBN 9788522116355. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522116355>

GUERRA, A. J. T. (Org.) **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011, 277p.

HAMMER, O. *et al.* PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica**, 4, 9 p., 2001. Disponível em: <[https://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm)>. Acesso em: 06 jun. 2024.

HORTON, R. E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 5, p. 399-417. 1941. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075x>

HUANG, H; CHENG, S; WEN, J; LEE, J. Effect of growing watershed imperviousness on hydrograph parameters and peak discharge. **Hydrological Processes**, Taiwan, n. 22, p. 2075-2085, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6807>

INMET. **Mapa de Estações Meteorológicas**. Estação A507, Uberlândia - MG. 2019. Disponível em: <<https://mapas.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 1 abr. 2024.

IPCC. **AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023**. AR6 SYR Core Writing Team Meeting 4 (10-12 March 2023, Interlaken, Switzerland). 2023.

JONES, D. K; BAKER, M. E; MILLER, A. J; JARNAGIN, S. T; HOGAN, D. M. Tracking geomorphic signatures of watershed suburbanization with multitemporal LiDAR. **Geomorphology**, v. 219, p. 42-52, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.038>

JORGE, M.C.O. Geomorfologia Urbana: Conceitos, Metodologias e Teorias. In: GUERRA, A.J.T. (org). **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 2011.

KEIFER, C. J; CHU, H. H. Synthetic storm pattern for drainage design. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v.83, n.4, p.1-25, 1957. DOI: <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000104>

KEILER, M., KNIGHT, J. & HARRISON, S. Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. **Philosophical Transactions of the Royal Society, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 368, 2461–2479, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0047>

LAIMER, H.J. Engineering geomorphology: A novel professional profile to face applied challenges in earth surface dynamics in mid-Europe. **Earth Surface Processes and Landforms**, 46(11), 2127– 2135, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5176>

LAPPICY, T.; COSTA, M. E.; KOIDE, S. Uso do SWMM para modelagem de cenários em uma lagoa de retenção e uma área de expansão. **XIII Encontro Nacional de Águas Urbanas**, Porto Alegre/RS, 2020. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/346108962>>.

LEAL, M., RAMOS, C., PEREIRA, S. Different types of flooding lead to different human and material damages: the case of the Lisbon Metropolitan Area. **Natural Hazards**, v. 91, P. 735–758, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3153-3>

LI, J., YANG, L., PU, R. *et al.* A review on anthropogenic geomorphology. **Journal of Geographical Sciences**. 27, 109–128, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1367-7>

LIMA, D. M. **Aplicação do MDE de alta resolução espacial em uma abordagem distribuída do modelo NRCS-CN-HUT**. 2017. 88 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, [S. l.], 2017. Disponível em: <<http://ct.ufpb.br/>>

LUO, P; LUO, M; LI, F; QI, X; HUO, A; WANG, Z; HE, B; TAKARA, K; NOVER, D; WANG, Y. Urban flood numerical simulation: Research, methods and future perspectives. **Environmental Modelling & Software**, v. 156, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105478>

MASCARÓ, J. L. **Loteamentos Urbanos**, 2 ed. Porto Alegre: Mais Quatro Editora, 2005. 210 p.

MATA-LIMA, H. VARGAS, H; CARVALHO, J; GONÇALVES, M; CAETANO, H; MARQUES, A; RAMINHOS, C. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto**, 60(3): 525-536, jul. set. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000300014>

MDE, Maryland Department of Environmental Resources. **Low-Impact Development: An Integrated Design Approach**. Prince George's County, Maryland, EUA, 1999. Disponível em: <<https://www.princegeorgescountymd.gov/DocumentCenter/View/86/Low-Impact-Development-Design-Strategies-PDF>>.

MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA. **Lei complementar nº 245, de 30 de novembro de 2020**. Dispõe sobre o parcelamento e zoneamento do uso e ocupação do solo do município de Uberlândia e revoga a lei complementar nº 224 de 23 de dezembro de 1999 e suas alterações posteriores. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/mg/u/uberlandia/lei-complementar/2000/24/245/lei-complementar-n-245-2000-dispoe-sobre-o-parcelamento-e-zoneamento-do-uso-e-ocupacao-do-solo-do-municipio-de-uberlandia-e-revoga-a-lei-complementar-n-224-de-23-de-dezembro-de-1999-e-suas-alteracoes-posteriores>. Acesso em: 29 jun. 2024.

NIR, D. **Man, a Geomorphological Agent: An Introduction to Anthropogenic Geomorphology**. Jerusalem: Keter Publishing House and D. Reidel Publishing Co. Google Scholar. 1983.

NISHIYAMA, L. **Procedimentos de mapeamento geotécnico como base para análises e avaliações ambientais do meio físico, em escala 1:100 000: aplicação no município de Uberlândia - MG**. 1998. 372 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/ São Carlos, 1998.

OLIVEIRA, I. R. de. Tratar a cidade como ecossistema: contribuições teórica e prática visando à sustentabilidade urbana. **Tecnologia e Ambiente**, [S.l.], v. 24, p. 33 - 55, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18616/ta.v24i0.4365>

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **São Paulo terá perto de 24 milhões de habitantes em 2030**. 2018. Disponível em <<https://news.un.org/pt/story/2018/10/1645482>>

PEDROSA, A. S; NARDIN, C. F. R; DANELON, J. R. B. Os riscos de inundações urbanas: uma proposta de gestão das águas pluviais nos aglomerados urbanos. In: **Geografia, Cultura e Riscos: Livro de Homenagem ao Prof. Antônio Pedrosa**. Imprensa da Universidade de Coimbra: Coimbra, Portugal. 2016. p. 309 – 340.

PEREIRA, J. S. **Mapeamento das voçorocas e análise da susceptibilidade erosiva no município de Uberlândia, MG**. 2021 197 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.5529>

PETRUCCI, E. **Características do clima de Uberlândia-MG: análise da temperatura, precipitação e umidade relativa - Uberlândia**. 2018. 245 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: **Drenagem urbana**. TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. Porto Alegre/RS, Editora da UFRGS e ABRH, 1995, 428 p.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos: EESC-USP, 2006.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S., SILVA, D.D. Escoamento superficial. Viçosa: UFV, 2014, 88 p.

REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G. Gestão de águas pluviais urbanas. In: Santos, A. S. P.; Júnior, A. A. O. **Engenharia e Meio Ambiente - Aspectos Conceituais e Práticos**. Grupo GEN, 2021. E-book. ISBN 9788521637523. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637523>>

- RODRIGUEZ, F., ANDRIEU, H., CREUTIN, J.-D. Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. **Journal of Hydrology**, v. 283, Issues 1–4, 2003, p. 146-168. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00246-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00246-4)
- RODRIGUEZ, F., BOCHER, E., CHANCIBAULT, K. Terrain representation impact on periurban catchment morphological Properties. **Journal of Hydrology**, v. 485, 2013, p. 54-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.023>
- ROSA, R. M. **Unidades de paisagem e zoneamento**: subsídios para o planejamento ambiental na bacia do rio Uberabinha-MG. 2017. 118 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2017.318>
- SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO E LICENCIAMENTO - SMUL. Prefeitura de São Paulo. O fenômeno da ocupação esparsa no processo de expansão da área urbanizada no Município de São Paulo. **Informes Urbanos**, São Paulo, ed. 58, p. 1-31, 2023. Disponível em: [https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2023/06/58\\_IU\\_MANCHA-URBANA-1.pdf](https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2023/06/58_IU_MANCHA-URBANA-1.pdf). Acesso em: 17 set. 2024
- SEYEDASHRAF, O; BUSOLIN, A. B; HAROU, J. J. Assisting decision-makers select multi-dimensionally efficient infrastructure designs – Application to urban drainage systems. **Journal of Environmental Management**, v. 336, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117689>
- SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. **Engineering News-Record**, v. 108, p. 501-505. 1932.
- SIDEK, L.M. *et al.* Application of PCSWMM for the 1-D and 1-D-2-D Modeling of Urban Flooding in Damansara Catchment, Malaysia. **Applied Sciences**, v. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199300>
- SILVIA & SHIMAKURA. **Interpretação do coeficiente de correlação**. 2006. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>
- STOFFEL, M., HUGGEL, C. Effects of climate change on mass movements in mountain environments. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, 36(3), 421–439, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133312441010>
- SU, M; ZENG, Y; HAO, Y; CHEN, Q; CHEN, S; CHEN, Z; XIE, H. The influence of landscape pattern on the risk of urban water-logging and flood disaster. **Ecological Indicators**, v. 92, 2018, p. 133-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.008>
- SUDERHSA. **Manual de Drenagem Urbana**: Região Metropolitana de Curitiba/PR. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, p. 1–150, 2002.
- TATE, E; RAHMAN, M.A; EMRICH, C.T; SAMPSON, C. C. Flood exposure and social vulnerability in the United States. **Natural Hazards**, v. 106, p. 435–457, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04470-2>
- THORNBUSH, M. J.; ALLEN, C. D. **Urban Geomorphology, Landforms and Processes in Cities**. Elsevier. 2018. 362 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02169-1>
- TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRS: ABRH, 2001. v. 4, cap. 11, p. 391-441. ISBN 85-7025-298-6.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (orgs). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 28 mar. 2023.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana**. Porto Alegre/RS, Editora da UFRGS, ABRH, 1995, 428 p.



UNESCO. **UN World Water Development Report 2020: Water and Climate Change**. Paris. 2020. Disponível em: <<https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2020/>>.

VISSMAN, W. JR.; HARBAUGH, T.E; KNAPP, J.W. **Introduction to hydrology**. New York, Intext Educational, 1972.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: CETESB, 1978.

WOOD, E.F; SIVAPALAN, M; BEVEN, K; BAND, L. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. **Journal of Hydrology**, 102, 1, 29–47, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90090-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90090-X)

ZINDA, J. A; LI, Y; LIU, J. C-E. China's summons for environmental sociology. **Current Sociology**, v .66(6), p. 867-885, 2018. DOI: 10.1177/0011392118778098

ZOPPOU, C. Review of urban storm water models. **Environmental Modelling & Software**, v. 16, Issue 3, p. 195-231, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).